中国科学院为北斗卫星导航系统时空基准相关技术提供基础性支撑

肖伟刚

中国科学院 重大科技任务局 北京 100864

摘要 文章以全球卫星导航系统的时空基准为线索，从卫星导航系统原理及精准定位技术的实现出发，从时空关系、测轨测距、精准计时到时间同步等，综述了中国科学院为北斗卫星导航系统建设所依赖的时空基准技术所作的基础性支撑。

关键词 全球卫星导航系统（GNSS），时空基准，核心基础

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20200624001

2020年7月31日，习近平总书记在北斗三号全球卫星导航系统建成暨开通仪式上充分肯定北斗系统建设取得的成就，并指出，北斗三号全球卫星导航系统的建成开通，充分体现了我国社会主义制度集中力量办大事的政治优势，对提升我国综合国力，对进一步增强民族自信心、努力实现“两个一百年”奋斗目标，具有十分重要的意义。

自1994年起，北斗卫星导航系统（以下简称“北斗系统”）建设经过了北斗一号、北斗二号到如今的北斗三号工程，其性能可与美国全球定位系统（GPS）等媲美。作为国家战略科技力量，中国科学院在北斗系统精准定位的核心——时空基准的建立、保持和传递技术中给予了核心支撑，起到了中流砥柱作用；通过与工业部门密切协同，较好地履行了“面向国家重大战略需求”的使命担当。

1 时空基准技术是全球卫星导航系统实现精准稳定定位的基础

时空基准的获得源于天文学知识的积累，也是定位导航和定时技术（PNT）领域发展的基础问题。全球卫星导航系统（GNSS）的定位离不开时空基准做参考，而根植于天文观测技术的时空基准技术是所有导航定位定时技术的核心基础。

GNSS是天地一体化运行的全球域基础设施。国际上四大卫星导航系统——美国GPS、俄罗斯全球卫星导航系统（GLONASS）、欧洲伽利略卫星导航系统（Galileo）和中国北斗系统，其定位都是基于“三球交汇”的几何测量原理并依靠现代微波通信技术、

修改稿收到日期：2020年8月31日

宇航技术等在地球空间大尺度实现的。不论是古时观"星"的自然星，还是今日观"星"的人造星，精准的定位定时是一切观测的根本基础。可见，导航卫星测定轨技术和计时守时技术（时空基准实现和传递）的精度水平是决定 GNSS 精准定位能力的关键。从 GNSS 原理可知，光速很大，以时间来推算距离，极其微小的卫星信号时间差就能导致测量上的巨大误差。动态精确地建立卫星的坐标和时间基准是确保 GNSS 实现精准定位功能的关键核心。GNSS 卫星搭载的星务管理计算机和导航任务生成器需要时刻精确了解卫星自身的轨道位置和系统时间，而地球上的监测站网则会连续跟踪卫星的轨道位置和保障准确的系统时间。以美国 GPS 为例：GPS 系统时间由卫星上的铯原子钟和铷原子钟保持，可精确到国际协调时（UTC）的几纳秒以内，而 UTC 目前由美国海军天文台的守时原子钟组提供，其位于美国科罗拉多州施里弗空军基地内的主控站和运控段每天至少对每颗 GPS 卫星注入 1 次校正数据，其中就包括每颗卫星的轨道位置和星载时钟的校正。

*在空间基准方面。*导航卫星的轨道参数需在准惯性的地心天球参考系中进行解算，因此需要知道测站所在地球位置点相对地心天球参考系的精准位置和姿态。为了解决这个问题，国际地球自转服务参考组织（IERS）[①]协调全球各类天文望远镜观星测地，实时公布地球相对地心天球参考系的各种复杂运动参数结果，用于导航卫星定位定轨所需的高精度时空基准坐标变换。此外，作为空间原初参考基准的遥远恒星和河外天体（天球参考架的基准源）也有极缓慢且微弱的变化，这些天体的位置和运动参数需要不断更新（平均每 5—10 年更新 1 次），而这也必须依靠天文测量观测来实现。目前，国际上主要的天球参考架均由欧洲和美国编制。为了北斗系统长远发展和自主可控，我国急需填补独立编制天球参考架的空白。目前，北斗坐标系定义对标最新的国际地球参考框架，按照 IERS 规范每年更新 1 次。中国科学院天文领域专家保持着国际交流合作，积极跟踪相关进展，支持着北斗系统建设。

*在时间基准方面。*卫星搭载的时钟都异常精准，普遍可达到 1 000 年只差 1 秒的水平，并由地面不断校正，从而实现"时空统一，推算准确"。时空不能分割，GNSS 系统中各节点（如卫星上时间、地面段时间、用户接收机时间）的时间信号同步性要求极高，否则无法精确做到由时间推算距离。在 GNSS 地面段生成轨道（空间基准支持测定轨）和钟差（时间基准支持定时计时）2 类基础电文参数中，卫星的钟差获取的精度已成为高精度导航定位服务的主要误差源和发展瓶颈之一[2]。目前，只有原子钟具备高精度的计量时间能力。建立在现代原子分子物理学并以激光波谱探测等高精密光电技术发展为基础的高精度、高稳定性（星载/地面）原子钟技术成为精准计时的必需手段。高精度的卫星导航定位服务对原子钟、时间基准、时间同步等时频类指标要求越来越高，如 GPS ⅡR、GPS ⅡF 等系列卫星的用户测距误差（URE）[②]性能的提升，核心因素之一就是采用了更加稳定的星载原子钟及相应的高精度时频测量控制技术；Galileo 系统试验卫星的伪距测量精度较高且稳定，在很大程度上也得益于其新型星载氢原子钟的应用。

2 中国科学院为 GNSS 时空基准的保持和传递提供基础支撑

北斗系统是中国航天史上规模最大、建设周期最长、技术难度最大、信息交融最复杂、全球覆盖面最广的重大基础设施工程，是我国自主建设、独立运

① 该组织由欧美国家主导，中国是重要成员。
② 用户测距误差，导航星座的用户伪距测量精度的重要指标，用于评判定位性能。

行、与世界其他卫星导航系统兼容共用的GNSS。中国科学院天文领域研究单位默默耕耘，在空间坐标、观星定轨测距和时间基准测量确定技术方面最早开展研究工作并始终保持行业领先，从基础研究到成果转化，全力支持国家卫星导航系统事业的建设发展，在北斗天地一体化信息流中的时空基准保持和传递相关技术中发挥了核心引领作用

2.1 卫星测定轨和钟差预报是传递时空基准的第一层技术

北斗系统空间段由同步静止轨道、同步倾斜轨道和中低椭圆轨道 3 种轨道卫星组成混合导航星座，而且地面监测站网是区域性的，没有形成全球分布，因此卫星观测弧段受限，对卫星轨道的测量不够全面，这加大了卫星轨道和钟差的确定难度。如何获取卫星的准确实时位置信息，是首要、核心、关键、棘手的问题。

中国科学院上海天文台（以下简称“上海天文台”）在天体测量与天体力学和星座运行观测、精密时间频率标准等方面积累了时空坐标系变换与卫星测定轨精确计算的学科优势，自北斗一号起就支持北斗系统地面段的部分相关“时空信息”模块研制。首次提出并实现了“区域监测网+星间链路”的星地/星间联合精密定轨技术，并特别设计了联合定轨数据处理算法的稳健性和容错性，发展了固定预报卫星轨道和监测站坐标、实时估计卫星钟差的滤波估计方法。打造的北斗系统地面段的信息处理系统部分基础模块，能实时修正误差、多备份，以保持高可靠度，从而确保了北斗系统空间信号精度堪与GPS比肩。

在叶叔华院士的带领下，上海天文台从 20 世纪 90 年代就开始承担北斗系统地面段时间统一系统的研制任务。持续研发新技术、新方法，克服种种困难，实现了从基础天文学科研到工程化技术支撑的艰难转型，突破了时间频率信号净化及长距离低损传输等关键技术，研制了时间频率系统部分重要单机，包括主动型氢原子钟、频率切换器、频率分配器、频率净化器、频率相位微跃计等，为北斗系统的长时间可靠运行“保驾护航”。

2.2 激光卫星测距技术是辅助超远测定轨的直接测量工具

卫星激光测距技术是天文学研究中常用的一种实时测量技术。上海天文台卫星激光测距技术研究（SLR）始于 20 世纪 70 年代，并于 1972 年成功建成我国第一台完整并投入应用的卫星激光测距系统。上海天文台先后研制出我国第一、二、三代卫星激光测距系统，对带有激光反射器卫星的单次测距精度由最初的米级发展到现在步入国际前列的亚厘米级，并在我国卫星精密定轨、天文地球动力学、地壳运动监测等领域中起到了重要作用。通过上述应用，上海天文台为北斗三号高精度测量研制了国内首套可移动式全天时卫星激光测距系统，突破了可移动平台条件下高轨卫星白天激光指向与瞄准、信号实时识别与探测等关键技术，实现了北斗导航卫星厘米级精度的星地距离测量，独立于无线电微波测量系统，应用于北斗导航卫星轨道误差、空间信号、导航定位等指标精度的标定。目前，激光测距技术已作为北斗系统地面运控系统唯一高精度星地距离直接测量手段，在北斗系统中发挥着重要作用，并引领了国内可移动式卫星激光测距技术发展。

此外，上海天文台在国内首先开展激光时间比对技术研究，实现了单光子探测器航天工程化应用，研制出星载激光时间比对测量仪，并成功应用到北斗系统；还在国际上首次实现导航卫星高精度星地激光时间比对测量，在国外同领域中引起积极反响。

2.3 GNSS卫星的“心脏”——星载原子钟

由于采用光速传输的电磁波信号进行测距，卫星 1 纳秒的时间误差可导致 0.3 米的距离测量误差，因此精准的时间保障尤为重要。原子钟是利用原子跃迁频率非常稳定的特点进行计时的工具。目前，原子

钟在太空环境下能够做到300万年误差1秒。全球四大GNSS的卫星均装载了高性能原子钟，包括铷原子钟、铯原子钟和氢原子钟。

星载原子钟为卫星系统提供极为稳定的时间频率基准信号，因其必须稳定且不间断地运行，而被称为GNSS卫星的“心脏”。星载原子钟的精度决定了GNSS的定位、测速和授时精度，是一个国家是否具备独立发展GNSS能力的核心技术之一。星载原子钟精度要求高，制造技术难度大，曾长期被美国、俄罗斯、瑞士等少数国家所垄断。由于国外技术封锁，星载原子钟一度成为北斗系统工程的技术瓶颈。

2.3.1 星载铷原子钟

为了满足北斗系统工程建设需求，中国科学院精密测量科学与技术创新研究院（其前身之一为中国科学院武汉物理与数学研究所，以下简称“武汉物数所”）梅刚华团队开展了长达20余年的科技攻关。该团队利用具有完整自主知识产权的技术，突破了星载铷原子钟精度、小型化、寿命、可靠性和卫星环境适应性等关键技术，研制出达到世界先进水平的星载铷原子钟，使我国的星载铷原子钟技术实现了从无到有、由有到精的跨越，实现了在北斗导航卫星上的批量应用，为北斗系统工程建设作出重要贡献。

研制初期，武汉物数所虽有扎实的原子分子学等数学物理基础，但对于宇航工程产品研制的工艺质量条件却是“一穷二白”。1997年，梅刚华团队承担了国内第一个星载原子钟预研项目，从此开展星载铷原子钟技术攻关。2007年，星载铷原子钟首次搭载试验成功；2008年开始，第一代星载铷原子钟产品批量装备北斗二号卫星，精度为3纳秒/天。为尽快达到世界先进水平，早在2011年开展高精度铷原子钟攻关的同时，梅刚华就大力呼吁同时上马甚高精度铷原子钟攻关，以对标美国GPS的增强型铷原子钟同等性能指标，力争做到天稳定度3.8×10^{-15}的性能指标，这再一次引领了国内同行的发展。如今，该团队研究成果已实现了预期目标，达到国际领先水平。

在中国科学院精密测量科学与技术创新研究院的引领下，国内已经有多家科研机构具备研制星载铷原子钟的能力。与靠大批次筛选获得所需要性能产品不同，梅刚华团队研发的星载铷原子钟依靠设计合理保证了产品性能，第三代星载铷原子钟的精度可满足分米级导航定位精度需求。目前，北斗三号全部35颗组网卫星都装上了梅刚华团队的星载铷原子钟，在轨运行的星载铷原子钟总数为37台。

2.3.2 星载氢原子钟

作为精密计时器具，氢原子钟同时具备频率稳定性好和漂移率小的特点，这对导航信号精度的提升非常有益。目前，国外仅Galileo系统的导航卫星搭载了星载氢原子钟。上海天文台自20世纪60年代起承担我国UTC（NTSC）的授时工作，20世纪70年代研制出我国首台地面主动型氢原子钟。在此基础上，上海天文台联合中国科学院上海技术物理研究所和上海航天电子技术研究所，于2002年开始启动被动型星载氢原子钟技术研究。经过三代科研工作者的原理探索和工程化改造，研制出了中国首代星载氢原子钟产品，并于2015年9月搭载新一代北斗导航试验卫星升空，成为我国星载频标领域新的里程碑。

氢原子钟需要做很多力学、热学及抗辐射方面的特殊设计，才能满足在轨工作10年以上的寿命要求。上海天文台作为我国氢原子钟的主要研制单位之一，坚持向小型化和高可靠性攻关，攻克了一系列难题：采用国产元器件和原材料，实现了星载氢原子钟核心器部件自主可控；首次应用电极式微波腔，有效提高了星载氢原子钟微波腔Q值及原子跃迁信号强度；首创了星载氢原子钟时分双频调制技术，有效降低了星载氢原子钟输出频率对纠偏信号幅相变化的敏感性，使得其温度系数指标达到国际先进水平。

在北斗三号全球系统建设中，上海天文台已提供16台星载氢原子钟，均在轨运行良好。星载氢原子

钟在轨作为主钟使用并正逐步走向轻小型化。经测试评估，上海天文台研制的星载氢原子钟在轨天稳定度和漂移指标达到小系数 10^{-15} 量级，长期预报精度提升 1 个数量级以上，误差小于 1 纳秒/天（约 600 万年误差 1 秒），从而大幅度提升了北斗系统的时间基准精度。Galileo 星载氢原子钟与我国星载氢原子钟相比，两者地面测试性能相当；但从在轨综合表现来看，我国星载氢原子钟实现的用户测距误差更小。国产星载氢原子钟为北斗系统提供全球高精度导航定位服务和自主运行做出了有力的技术支撑。

2.4 最稳定准确“定时”——时间溯源和评估校对

中国科学院国家授时中心（以下简称“国家授时中心”），前身为1966年成立的陕西天文台，是我国唯一、专门、全面从事时间频率基础研究和应用研究的科研机构。自 20 世纪 70 年代初开始，国家授时中心承担我国标准时间（北京时间）、标准频率的产生与发播工作，同时采用GNSS 共视、卫星双向、GNSS PPP（精密单点定位）等多种手段，为我国通信、电力、交通、测绘、航空航天、国防等诸多行业和部门提供了点对点的超高精度时间频率可靠服务。在国家标准时间产生方面，国家授时中心拥有在规模上国内第一、世界第四的守时原子钟组，是国际原子时重要参与单位。虽然如今国家授时中心并非国内参加国际原子时计算的唯一单位，但只有国家授时中心建有独立地方原子时。2019 年最新数据表明，国家授时中心的国际原子时计算权重国际排名第三，UTC（NTSC）与国际 UTC 的偏差在 ±5 纳秒以内。该指标为国内最高、国际先进。

时间、轨道和信号是卫星导航系统的“三要素”。国家授时中心依托保持国家标准时间技术的优势，围绕北斗系统的工程建设和稳定运行，在提高北斗系统时间的准确度、可靠性和自主性方面，发挥了重要的作用。

*为北斗系统时间提供溯源参考。*作为授时系统，其播发的时间必须与国际 UTC 建立溯源关系。国家授时中心基于稳定可靠的时频技术积累，利用其保持的 UTC（NTSC），研制建成了北斗系统时间溯源系统；并确立了与北斗系统的常规比对关系，从溯源上高标准确保了服务信号的连续性，为北斗系统时间（BDT）向国际 UTC 溯源提供了高精度的参考。中国卫星导航系统管理办公室在 2019 年 12 月发布的《北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件精密单点定位服务信号 PPP-B2b（测试版）》中针对时间系统做了如下描述：“BDT 通过 UTC（NTSC）与国际 UTC 建立联系，BDT 与国际 UTC 的偏差保持在 50 纳秒以内（模 1 秒）”[3]。

*负责北斗系统时间性能的监测评估。*参与了北斗系统时间建设，积极承担北斗区域系统、试验卫星工程、基本系统和北斗全球系统 4 个阶段的北斗系统时间性能评估工作，促进北斗系统的建设与完善。

*负责北斗授时性能的监测评估工作。*建成我国第一套全面、实时连续运行的 GNSS 时差监测和授时性能评估系统，全面开展 GNSS 时间监测和服务性能评估工作，参与支持了北斗系统的全球连续监测评估系统部分工作。对北斗系统的授时性能进行数据评估，并运行维护 40 米天线的空间信号质量监测评估工作，为卫星入网服务的重要依据提供有效保障。

3 中国科学院在北斗系统全球组网和国际协调中发挥重要作用

3.1 确保空间段时空基准和导航信息的高效融合，为北斗系统全球组网提供保障

卫星是 GNSS 时空基准生成传递链条中的重要环节。中国科学院微小卫星创新研究院北斗导航卫星研制团队克服重重困难，先后完成了 12 颗北斗导航卫星的研制和发射，尤其是 2018 年连续、高密度组批研制发射做到了保质按时，为北斗系统全球组网星座部署提供了有力支撑，实现了众多关键技术的突破与创

新。2015 年首发卫星成功验证了 Ka 星间链路体制、新型导航信号体制等关键体制类技术，为北斗三号全球组网卫星技术状态确定争取了宝贵时间，奠定了坚实的技术基础。

中国科学院的卫星研制在确保时空信号传递的高效性方面具备如下创新特色：① 采用框架面板结构、单独星敏感器定姿、高功能密度综合电子架构等技术，打造了“中国科学院导航卫星专用平台”，其重要软件具有在轨重构升级能力，从而有效增强了卫星的适应能力和可扩展能力。② 突破了基于相控阵的 Ka 星间链路技术，实现了“一星通、星星通”，从而解决了制约北斗全球组网的瓶颈问题。③ 突破了高精度时频无缝切换技术，解决了北斗区域系统的连续性方面的短板，为实现全球系统信号的高连续性奠定了基础。④ 首次在导航卫星上采用大功率氮化镓固态放大器，有效提高了信号质量；率先采用国产龙芯 CPU 芯片，有力推动了卫星核心器件从根本上的自主可控。⑤ 突破了卫星自主诊断恢复技术，在完全没有地面干预的情况下，卫星可以进行自主健康诊断、故障隔离和恢复，极大提高了卫星的可用性。

3.2 时间基准的服务稳定连续，有效促进国际交流合作

卫星导航系统所有信号的生成、观测、处理等设备都必须在统一的时频信号的驱动下进行工作，时频信号质量直接影响各类设备的工作水平，而时频基准的高精度和高稳定性是信息层统一精确时标信息码的基本保障[2]。如果系统时间跳变，将导致全系统服务的不连续，可谓“牵一发而动全身”。2019年7月，Galileo 由于地面段运控系统时间频率同步系统出现了故障，服务一度中断达 117 小时。虽然精度未超出承诺的 URE 7 米的指标，但由于服务连续性、可用性未达到指标要求，使得 Gallileo 国际形象大受影响。

确保GNSS服务连续好用，以及拥有深厚优势的时间基准技术，是开展 GNSS 国际协调的基础。2017 年国家授时中心与欧洲守时实验室的合作，初步实现了基于北斗系统 7 000 公里的长基线国际时间比对。该次比对试验使用了北斗共视的方法，精度达到了 2—3 纳秒，其性能指标与 GPS 相当，这对北斗系统实现国际化应用具有重要里程碑意义。除此之外，国家授时中心还与多家世界主要时频研究机构达成了北斗系统时间比对合作意向。

全球四大 GNSS 通过加强兼容互操作，可有效改善观测几何条件，提高全球任何地区的定位精度，提升全球导航服务可用性。各 GNSS 之间开放信号的互操作可以在各自独特设计的基础上，实现频谱的相似性，同时实现星座互补、时间互操作、坐标相互转换，从而为用户提供更好的服务。联合国外空司于 2005 年 12 月成立了全球卫星导航系统国际委员会（ICG），其主要宗旨就是为了增强不同卫星导航系统之间的兼容与互操作，推动全球联合应用。中国科学院天文领域研究人员是 ICG 大会的重要参与者：国家授时中心科研人员担任互操作与服务标准子工作组联合主席，上海天文台科研人员担任互操作工作组下设的国际卫星导航监测评估任务组联合主席；并在时间互操作、导航信号兼容、系统间时差监测与播发方案等方面的国际协调中发挥了重要的作用，从而有力支持了中美、中欧等导航领域多边国际合作交流工作。例如，在 2019 年 12 月 ICG-14 会议上，国家授时中心力主的基于统一、平等标准的系统对系统的直接时差监测技术得到了大会采纳；在中俄卫星导航系统双边合作中，国家授时中心作为北斗系统和 GLONASS 系统时间互操作的中方责任单位、上海天文台作为专家组成员，积极推动了中俄双方在时间、坐标参数等方面的交流，从而有力推动了双边合作。

习近平总书记在向联合国全球卫星导航系统国际委员会第十三届大会所致贺信中指出，“2035 年前还将建设完善更加泛在、更加融合、更加智能的综合时

空体系。中国愿同各国共享北斗系统建设发展成果，共促全球卫星导航事业蓬勃发展”。我国北斗系统已经全面建成，正进入集成测试评估并稳定精准运行时期。面向新时代，走向“北斗+”，中国科学院将继续协同全国北斗同仁持续砥砺前行，继续夯实基础，打牢基准，为全球卫星导航系统更好服务全球、造福人类贡献智慧和力量。

致谢 本文撰写过程中得到了上海天文台齐朝祥研究员的悉心指导，特此感谢！

参考文献

1 Acharya R. 卫星导航基础原理. 袁洪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2017.

2 卢鋆等. 卫星导航系统定位精度与时间频率指标关系及分解方法研究// 第三届中国卫星导航学术年会报告. 北京: 中国卫星导航学术年会组委会, 2012: 93-95.

3 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件——精密单点定位服务信号PPP-B2b（测试版）. [2020-08-03]. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803_20930.html.

CAS Provides Basic Support for Space-time Datum of BDS

XIAO Weigang

(Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

Abstract Taking space-time datum of Global Navigation Satellite Systems as a clue, this paper starts from the basic principle of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) and it's technical realization including space-time relation, orbit and distance measurement, precise timing and time synchronization, expounds the fundamental contribution of Chinese Academy of Sciences (CAS) in precisely measuring and basic supporting for space-time datum which is the most indispensable for BDS (China's GNSS).

Keywords Global Navigation Satellite Systems (GNSS), space-time datum, core foundation



肖伟刚 中国科学院重大科技任务局高级工程师。长期从事光电与航空航天系统工程领域相关的国家科技重大专项和科技工程项目协调管理，参与组织研究了多项战略高技术发展规划。 E-mail: wgxiao@cashq.ac.cn

XIAO Weigang Senior Engineer of Bureau of Major R&D Programs, Chinese Academy of Sciences (CAS). He has long been engaged in coordination and management for national key projects of science and technology related to photoelectrical engineering and aerospace, participated in of planning research for strategic high technology. E-mail: wgxiao@cashq.ac.cn

■责任编辑：张帆